第 40 卷　第 5 期
2023 年 10 月

应　用　力　学　学　报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 5
Oct. 2023

文章编号:1000-4939(2023)05-1078-07

墩底设置无黏结钢筋的铁路重力式桥墩在静力作用下的抗震性能分析

鲁锦华,陈兴冲,丁明波,马华军

(兰州交通大学土木工程学院,730070 兰州)

摘　要:为了提高铁路重力式桥墩的延性性能,提出了在墩底局部设置无黏结钢筋的设计方法。设计 5 个不同无黏结钢筋类型的桥墩,采用数值分析方法研究无黏结钢筋数量及无黏结高度对桥墩抗震性能的影响。研究结果表明:墩底设置无黏结钢筋可有效改善铁路重力式桥墩的延性性能,且对桥墩的承载能力和刚度影响较小,但是会增加桥墩滞回曲线形状的“捏缩”效应;无黏结钢筋比例越大,桥墩的延性性能越好,钢筋无黏结高度在一定范围内对桥墩延性性能的影响较大;数值分析验证了在墩底布置无黏结钢筋的方法提高延性抗震性能的可行性。本研究成果可应用于铁路重力式桥墩抗震设计研究领域。

关键词:无黏结钢筋;铁路重力式桥墩;数值分析;抗震性能;延性性能

中图分类号:U24　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.05.013

Seismic performance analysis of railway gravity piers with unbonded reinforcement at the bottom of piers under static load

LU Jinhua, CHEN Xingchong, DING Mingbo, MA Huajun

(School of Civil Engineering Lanzhou Jiaotong University, 730070 Lanzhou, China)

Abstract: In order to improve the ductility performance of railway gravity piers, the design method of local unbonded reinforcement at the bottom of piers is proposed. Five piers with different types of unbonded steel bars are designed. Numerical analysis is used to study the influence of the amount and height of unbonded reinforcement on the seismic performance of railway gravity piers. It is found that the unbonded reinforcement at the bottom of the pier can effectively improve the ductility performance of the railway gravity pier, and it has little influence on the bearing capacity and stiffness of the pier, but it will increase the “pinching” effect of the shape of the hysteresis curve of the pier. The ductility performance of piers gets better with the increase of the amount of unbonded reinforcement. The unbonded height of reinforcement has a great influence on the ductility of pier in a certain range. The feasibility of improving ductile seismic performance by installing unbonded reinforcement at the bottom of pier is verified by numerical analysis.

收稿日期:2021-12-15　　**修回日期**:2022-01-30
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51768036;51968039);甘肃省教育科技创新基金项目(No. 2022A-033)
通信作者:鲁锦华,博士后。E-mail:814926385@qq.com
引用格式:鲁锦华,陈兴冲,丁明波,等. 墩底设置无黏结钢筋的铁路重力式桥墩在静力作用下的抗震性能分析[J]. 应用力学学报,2023,40(5):1078-1084.
LU Jinhua, CHEN Xingchong, DING Mingbo, et al. Seismic performance analysis of railway gravity piers with unbonded reinforcement at the bottom of piers under static load [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(5):1078-1084.

The research results can be applied in the research field of seismic design of railway gravity piers.

Key words: unbonded longitudinal reinforcement; railway gravity bridge pier; numerical analysis; seismic performance; ductility performance

铁路重力式桥墩由于截面尺寸大,且仅配置护面钢筋,导致其配筋率较低。在国内已有研究中发现低配筋铁路重力式桥墩的延性性能不足。鞠彦忠等[1-2]对配筋率为0.1%和0.2%的铁路重力式桥墩进行的拟静力试验中发现桥墩破坏时呈脆性破坏,建议配筋率为0.1%的桥墩在设计时采用弹性设计,不考虑其延性。蒋丽忠等[3]对配筋率为0.15%、0.4%和0.75%的高速铁路重力式桥墩研究发现,其位移延性系数多数小于规范允许的4.8限值,在赵冠远等[4]的研究中也有类似的结论。在文献[5]的研究中发现配筋率0.1%的桥墩使用光圆钢筋时,桥墩破坏时极限位移较大,通过分析发现主要是由于光圆钢筋和混凝土之间的黏结力较小,导致桥墩破坏时的位移较大。基于减小钢筋与混凝土之间的黏结力的考虑,提出了在墩底设置钢筋无黏结区域的设计方法,以达到提高铁路重力式桥墩延性性能的目的。

目前无黏结钢筋主要使用在体外预应力加固中,提高结构的承载能力和抗裂性[6-7];在节段拼装预制桥梁中也普遍使用,主要用于提高桥墩的抗剪性能[8-10];在研究较多的摇摆桥墩中也广泛采用,使摇摆桥墩拥有自复位的能力[11-13];另外在自复位框架结构中也在使用[14-15],其作用和在桥墩中一致,使结构在地震作用下拥有自复位能力。以上研究均是设置通长无黏结预应力筋,在墩底局部设置钢筋无黏结区域的研究尚未见到。为了研究在墩底局部设置无黏结钢筋提高铁路重力式桥墩的延性性能的可行性,设计5个桥墩,采用数值分析的方法对其进行研究。

1　桥墩设计

为了研究无黏结钢筋对铁路重力式桥墩抗震性能的影响,参考文献[5]中模型桥墩,设计5个不同无黏结钢筋类型的桥墩,墩高为125 cm,箍筋间距为10.3 cm,截面尺寸为36 cm×25 cm,纵筋直径8 mm,箍筋直径6 mm,混凝土强度为C30。无黏结钢筋具体布置形式见图1,桥墩设计参数见表1。

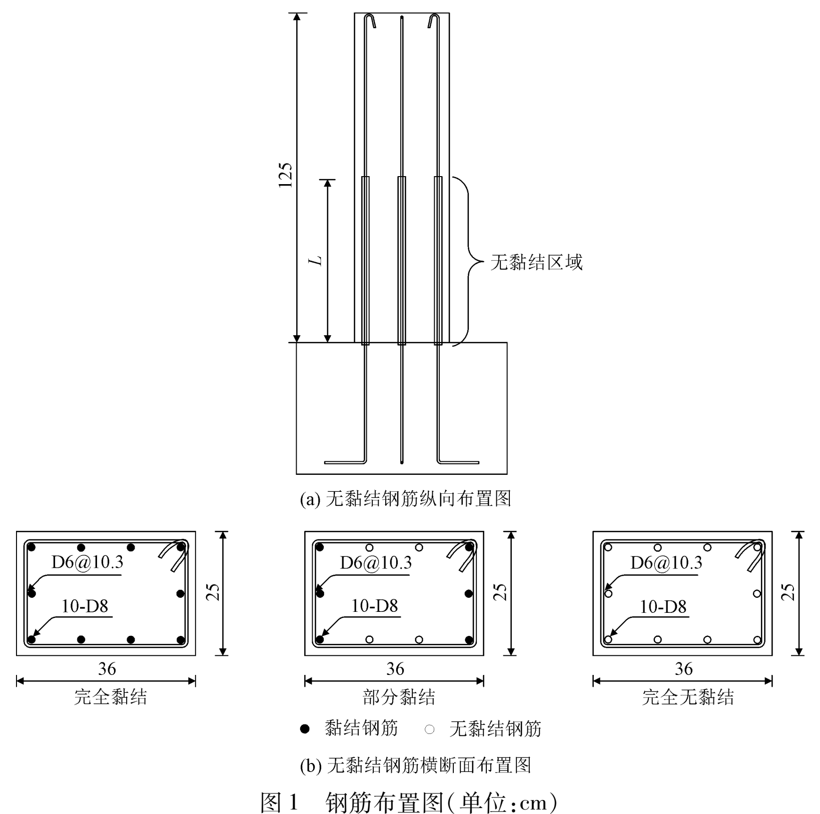


图1　钢筋布置图(单位:cm)

Fig. 1　Reinforcement drawing (unit:cm)

表1 桥墩设计参数

Tab. 1 The design parameters of piers

桥墩编号	黏结条件	无黏结高度/cm	无黏结钢筋比例/%
S1	完全黏结	—	0
S2	完全无黏结	20	100
S3	部分无黏结	20	40
S4	部分无黏结	40	40
S5	部分无黏结	80	40

2 数值分析模型验证

基于ANSYS有限元分析软件建立实体单元模型，以文献[16-17]中提出的建模方法，建立分离式的桥墩数值分析模型。模型中，采用SOLID65单元模拟混凝土，混凝土本构选用Mander模型[18]；采用LINK180单元模拟钢筋，钢筋本构选用考虑纵筋包辛格效应的多线性随动强化模型(KINH)[16]；在钢筋节点与混凝土节点之间建立COMBIN39单元，模拟钢筋与混凝土节点之间的黏结-滑移，黏结-滑移本构选用理想弹塑性模型[19]。为了确保模型的计算精度和收敛性，结合文献[20-21]中网格尺寸划分的方法，本模型最终确定网格尺寸大小为50 mm × 50 mm × 50 mm。无黏结钢筋桥墩建立有限元分析模型时在无黏结区域的钢筋节点与混凝土节点之间不建立COMBIN39黏结滑移单元。

分析时在墩顶施加51.48 kN的竖向荷载，水平加载时采用位移控制，墩顶水平位移小于1 ~ 15 mm时，加载步长为2 mm，墩顶水平位移大于15 mm时，加载步长为5 mm，一直加载到破坏。

采用上述数值分析模型，对于完全黏结的S1桥墩计算得到桥墩的滞回曲线和骨架曲线，并与试验值[5]进行对比，如图2所示。

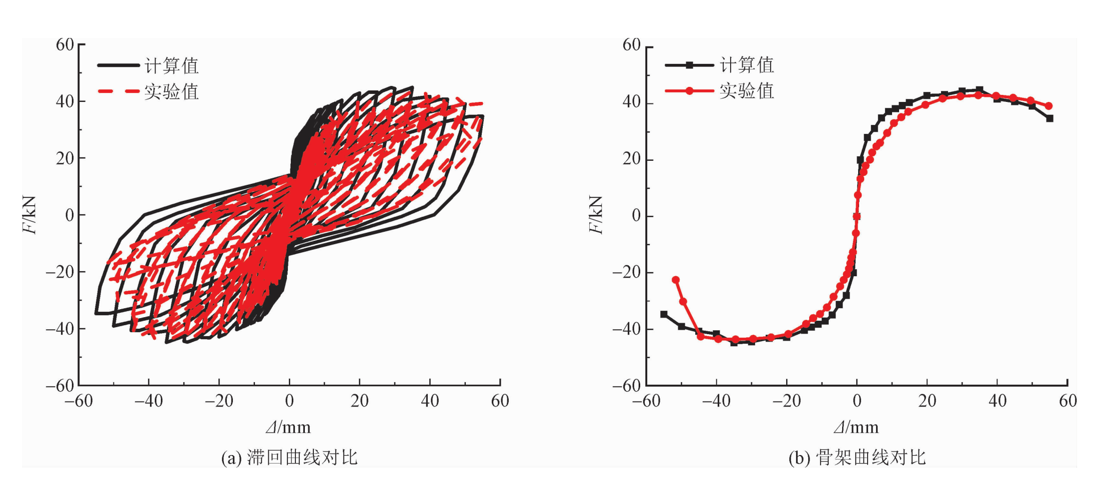


图2 桥墩试验值与计算值对比

Fig. 2 Comparison of experimental and simulated values

由图2可以看出，试验值与计算值吻合较好，该数值分析模型可以用于分析铁路重力式桥墩的滞回性能。

3 计算结果分析

3.1 滞回曲线

采用上述数值分析模型对5个不同无黏结钢筋类型的桥墩进行分析得到其滞回曲线，对比分析不同参数下铁路重力式桥墩的滞回曲线，如图3所示。

由图3(a) ~ (c)可知，随着无黏结钢筋比例的增加，桥墩的滞回曲线形状“捏缩”效应越明显。由图3(d)可以看出，当无黏结钢筋比例一定时，随着钢筋无黏结区域高度的增加，桥墩的滞回曲线形状“捏缩”略有增加。文献[5]中对铁路重力式桥墩的拟静力试验，发现其破坏区域主要集中在墩底，且实测钢筋应变变化曲线也表明上部钢筋受力较小，因此，结合数值分析分析结果，钢筋的无黏结区域高度按等效塑性铰长度的1.5倍取值，即可确保承载能力不降低的情况下使桥墩的延性抗震性能得到有效的提高。

(a) 完全黏结与完全无黏结

(b) 完全黏结与部分无黏结

(c) 部分无黏结与完全无黏结

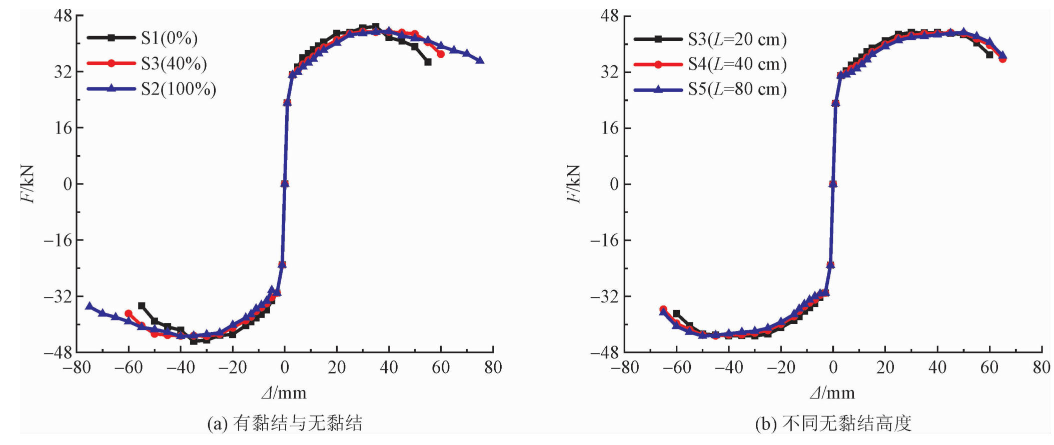
(d) 不同无黏结高度

图 3　桥墩滞回曲线对比图

Fig. 3　Comparison of hysteresis curves

3.2　骨架曲线

通过对桥墩滞回曲线的分析得到其骨架曲线，如图 4 所示。由图 4(a)可知，不同类型无黏结钢筋桥墩的骨架曲线在弹性阶段基本一致，说明在弹性阶段，钢筋有无黏结对桥墩的承载能力影响较小；随着加载位移的增大，桥墩进入弹塑性阶段，无黏结钢筋的比例越大，桥墩的水平承载力增加越慢。这主要是由于无黏结区域的存在钢筋的弹性变形较大，导致桥墩水平承载力增加缓慢。但桥墩的峰值荷载相差较小，说明钢筋黏结条件的变化对桥墩的承载能力影响较小。从图 4(a)中还发现，桥墩的极限位移随着无黏结钢筋比例的增大有明显的增加。由图 4(b)可知，无黏结钢筋的比例一定时，钢筋无黏结区域高度的变化对桥墩的承载能力和极限位移影响较小。



(a) 有黏结与无黏结

(b) 不同无黏结高度

图 4　桥墩骨架曲线对比图

Fig. 4　Comparison of skeleton curves

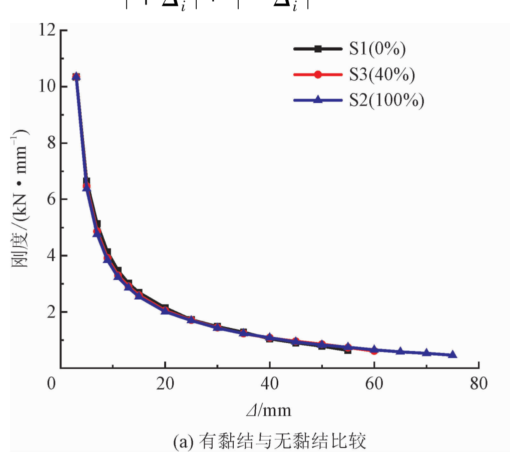
3.3 刚度退化

刚度的退化主要是由于混凝土开裂退出工作，有效截面高度降低引起的。为了更直观地体现刚度的变化，《建筑抗震试验规程》中引入了割线刚度的概念，计算公式见式(1)。

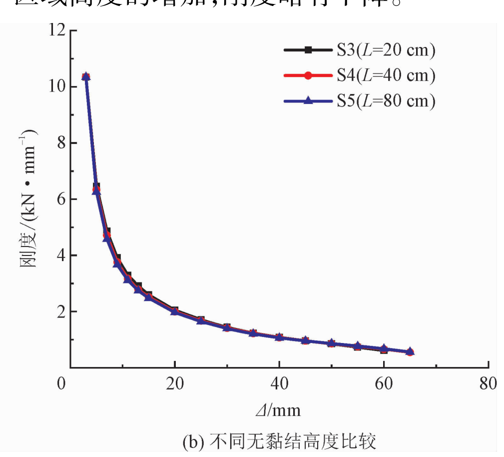
$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \tag{1}$$

其中：$\pm F_i$ 为正、反加载时峰值荷载；$\pm \Delta_i$ 为峰值荷载所对应的位移。根据式(1)计算得到桥墩的刚度退化曲线，如图 5 所示。

由图 5(a)和(b)可知，不论是随着无黏结钢筋的比例的增大，还是随着钢筋无黏结区域高度的增加，桥墩的刚度退化基本一致，仅在弹性向塑性过渡阶段，随着无黏结钢筋比例的增加或者钢筋无黏结区域高度的增加，刚度略有下降。



(a) 有黏结与无黏结比较



(b) 不同无黏结高度比较

图 5 桥墩刚度退化对比图

Fig. 5 Comparison of stiffness degradation

3.4 位移延性系数

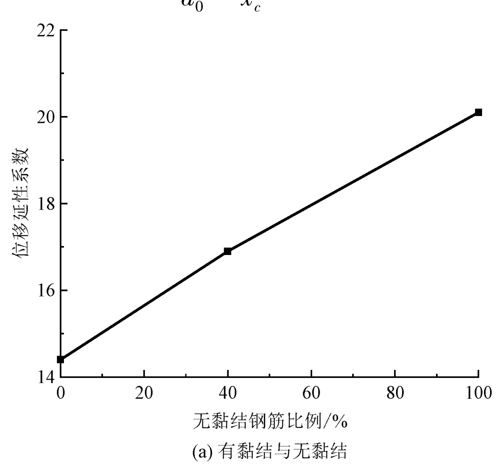
根据钢筋首次屈服时计算桥墩的屈服位移，具体按式(2)和式(3)计算[1-2]。

$$\Delta_y = \frac{1}{3}\varphi_y h^2 \tag{2}$$

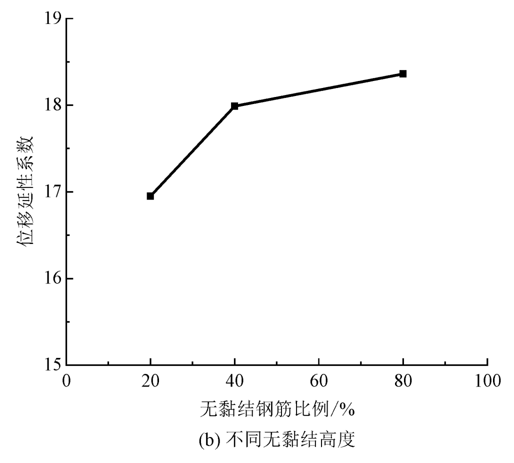
$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_{smax}}{d_0 - x_c} \tag{3}$$

式中：Δ_y 为桥墩屈服位移；φ_y 为桥墩屈服曲率；h 为桥墩有效高度；ε_{smax} 为纵向钢筋的屈服应变；d_0 为截面的有效高度；x_c 为中性轴距离混凝土受压侧边缘的距离。

计算得到桥墩的位移延性系数，其变化规律如图 6 所示。



(a) 有黏结与无黏结



(b) 不同无黏结高度

图 6 桥墩位移延性系数

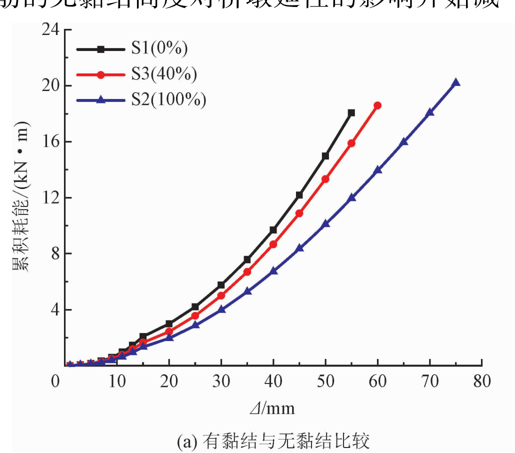
Fig. 6 Displacement ductility coefficient of piers

由图 6(a)可知，随着无黏结钢筋比例的增大，桥墩的位移延性系数有明显增大，说明在墩底增设无黏结钢筋可以有效提高桥墩的延性性能。由图 6(b)可以看出，当墩底无黏结钢筋比例一定时，随着

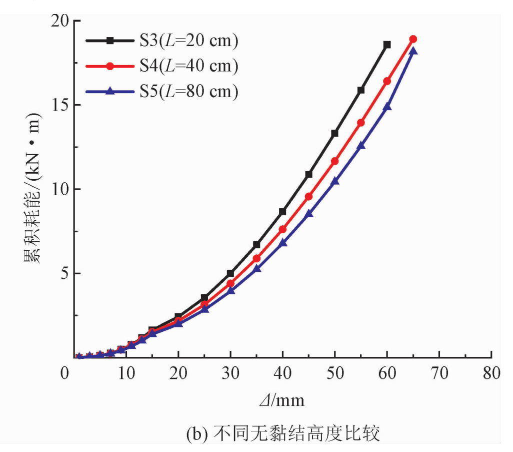
钢筋无黏结区域高度的增加,桥墩的位移延性系数在一定范围内有所增加。当无黏结高度增加到一定程度后,桥墩的位移延性系数变化较小,说明无黏结钢筋仅在墩底局部区域发挥作用。根据计算结果可知,钢筋的无黏结比例越大,桥墩的延性提高越多;钢筋无黏结区域高度达到等效塑性铰长度(15.9 mm)的 2.5 倍时,即无黏结高度达到 40 mm,再增加钢筋的无黏结高度对桥墩延性的影响开始减小,即钢筋的无黏结高度可按塑性铰长度的 2.5 倍取值。

3.5　耗能能力

桥墩的耗能能力是评价桥墩抗震性能的重要指标。采用《建筑抗震试验规程》中规定的能量累积计算方法,计算得到桥墩的累积耗能随位移变化的曲线如图 7 所示。



(a) 有黏结与无黏结比较



(b) 不同无黏结高度比较

图 7 桥墩累积耗能

Fig. 7　Cumulative energy consumption of piers

由图 7(a)可知,相同加载位移下无黏结钢筋的比例越大,桥墩的滞回曲线形状捏缩越严重,导致桥墩的累积耗能越少。但是由于无黏结钢筋的存在,钢筋的弹性变形增大,桥墩的极限位移增加,最终破坏时无黏结钢筋比例越大的桥墩累计耗能越大。从图 7(b)中可以看出,随着无黏结区域高度的增加,相同加载位移下,桥墩的累积耗能越少,最终破坏时,随着钢筋无黏结区域高度的增加桥墩的累积耗能相差不大,说明钢筋无黏结区域高度的变化对桥墩破坏时的累积耗能影响较小。

4　结　论

针对铁路重力式桥墩延性抗震性能不足的问题,提出了一种墩底布置无黏结钢筋的设计方法,通过不同无黏结数量和不同无黏结高度桥墩的数值模拟分析得到如下结论。

1)墩底无黏结钢筋数量的增大对桥墩的承载能力和刚度退化影响较小,但桥墩的滞回曲线形状捏缩严重。极限位移和累积耗能有明显增加,可以有效提高桥墩的延性抗震性能。

2)当钢筋无黏结高度达到塑性铰长度的 2.5 倍时,再增加钢筋的无黏结高度对桥墩延性性能的影响较小,其高度可按等效塑性铰长度的 2.5 倍取值。

3)数值分析验证了在墩底布置无黏结钢筋的方法可以在确保承载能力的前提下提高桥墩的延性抗震性能。

参考文献:

[1]　鞠彦忠,阎贵平,李永哲. 低配筋铁路桥墩抗震性能的试验研究[J]. 铁道学报,2004,26(5):91-95.
JU Yanzhong, YAN Guiping, LI Yongzhe. Experimental research on aseismic performance of RC railway piers with low steel ratios[J]. Journal of the China railway society, 2004, 26(5): 91-95 (in Chinese).

[2]　鞠彦忠,阎贵平,刘林. 低配筋大比例尺圆端型桥墩抗震性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2003,36(11):65-69.
JU Yanzhong, YAN Guiping, LIU Lin. Experimental study on seismic behaviors of large-scale RC round-ended piers with low reinforcement ratio[J]. China civil engineering journal, 2003, 36(11): 65-69 (in Chinese).

[3]　蒋丽忠,邵光强,姜静静,等. 高速铁路圆端形实体桥墩抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2013,46(3):86-95.
JIANG Lizhong, SHAO Guangqiang, JIANG Jingjing, et al. Experimental study on seismic performance of solid piers with round ended cross-section in high-speed railway[J]. China civil engineering journal, 2013, 46(3): 86-95 (in Chinese).

[4]　赵冠远,张同越,陈鑫. 低周反复荷载下高速铁路桥墩抗震试验研究[J]. 中国铁道科学,2014,35(4):38-44.

ZHAO Guanyuan, ZHANG Tongyue, CHEN Xin. Experimental study on the seismic performance of high speed railway bridge pier under low cyclic loading[J]. China railway science, 2014, 35(4): 38-44(in Chinese).

[5] 鲁锦华. 铁路重力式桥墩抗震性能及抗震设计方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2020.

[6] 李双,吴熠哲,朱慈祥. 预应力混凝土连续梁桥二次加固及效果分析[J]. 桥梁建设,2019,49(5):113-118.
LI Shuang, WU Yizhe, ZHU Cixiang. The second-time strengthening of a prestressed concrete continuous beam bridge and strengthening effect[J]. Bridge construction, 2019, 49(5): 113-118(in Chinese).

[7] 张骏. 大跨径PC连续梁桥体外预应力加固方法研究[D]. 西安:长安大学,2019.

[8] 姜海波,李宇鸿,肖杰,等. 预制节段干接缝体外预应力混凝土简支梁抗剪性能试验[J]. 中国公路学报,2018,31(12): 188-195.
JIANG Haibo, LI Yuhong, XIAO Jie, et al. Shear behavior of precast concrete segmental simply supported beam with external tendons and dry joints[J]. China journal of highway and transport, 2018, 31(12): 188-195(in Chinese).

[9] 石雪飞,刘志权,胡可,等. 全体外预应力节段预制拼装连续梁桥承载能力足尺模型试验[J]. 中国公路学报,2018,31(12): 163-173.
SHI Xuefei, LIU Zhiquan, HU Ke, et al. Full-scale test of bearing capacity of a complete external prestressed segmental precast continuous girder bridge[J]. China journal of highway and transport, 2018, 31(12): 163-173(in Chinese).

[10] 鲁亮,胡宇飞,刘霞. 体外预应力自复位框架拟静力试验研究[J]. 结构工程师,2018,34(3):128-135.
LU Liang, HU Yufei, LIU Xia. Quasi-static test of an external prestressing self-centering frame structure[J]. Structural engineers, 2018, 34(3): 128-135(in Chinese).

[11] 夏修身,唐径遥,韦性涵,等. 自复位高墩振动台模型试验[J]. 世界地震工程,2020,36(1):109-117.
XIA Xiushen, TANG Jingyao, WEI Xinghan, et al. Shaking table test of self-centering model bridge pier[J]. World earthquake engineering, 2020, 36(1): 109-117(in Chinese).

[12] 孙治国,赵泰儀,石岩,等. 摇摆-自复位桥墩抗震性能数值建模方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2019,27(6): 1357-1369.
SUN Zhiguo, ZHAO Taiyi, SHI Yan, et al. Research on numerical modeling method for rocking self-centering bridge piers[J]. Journal of basic science and engineering, 2019, 27(6): 1357-1369(in Chinese).

[13] 司炳君,谷明洋,孙治国,等. 近断层地震动下摇摆-自复位桥墩地震反应分析[J]. 工程力学,2017,34(10):87-97.
SI Bingjun, GU Mingyang, SUN Zhiguo, et al. Seismic response analysis of the rocking self-centering bridge piers under the near-fault ground motions[J]. Engineering mechanics, 2017, 34(10): 87-97(in Chinese).

[14] 高文俊,吕西林. 自复位钢筋混凝土框架振动台试验的数值模拟[J]. 结构工程师,2014,30(1):13-19.
GAO Wenjun, LÜ Xilin. Numerical simulation of a self-centering reinforced concrete frame under shaking table test[J]. Structural engineers, 2014, 30(1): 13-19(in Chinese).

[15] 吕西林,崔晔,刘兢兢. 自复位钢筋混凝土框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(1):19-26.
LÜ Xilin, CUI Ye, LIU Jingjing. Shaking table test of a self-centering reinforced concrete frame[J]. Journal of building structures, 2014, 35(1): 19-26(in Chinese).

[16] 司炳君,孙治国,艾庆华,等. 钢筋混凝土桥墩滞回性能的有限元参数敏感性分析及模型改进[J]. 工程力学,2009,26(1): 174-180.
SI Bingjun, SUN Zhiguo, AI Qinghua, et al. Sensitive analysis and model modification for finite element analysis of R/C bridge piers under cyclic loading[J]. Engineering mechanics, 2009, 26(1): 174-180(in Chinese).

[17] 鲁锦华,陈兴冲,丁明波,等. 少筋混凝土重力式桥墩抗震性能分析[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(9):2223-2232.
LU Jinhua, CHEN Xingchong, DING Mingbo, et al. Seismic performance analysis of railway gravity piers with low longitudinal reinforcement ratio[J]. Journal of railway science and engineering, 2019, 16(9): 2223-2232(in Chinese).

[18] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress - strain model for confined concrete[J]. Journal of structural engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.

[19] HAN T S, FEENSTRA P H, BILLINGTON S L. Simulation of highly ductile fiber-reinforced cement-based composite components under cyclic loading[J]. ACI structural journal, 2003, 100(6): 749-757.

[20] 聂建国,秦凯,肖岩. 方钢管混凝土柱节点的试验研究及非线性有限元分析[J]. 工程力学,2006,23(11):99-109,115.
NIE Jianguo, QIN Kai, XIAO Yan. Experimental investigation and nonlinear finite element analysis on the behavior of concrete-filled square steel tubular column connections [J]. Engineering mechanics, 2006, 23(11): 99-109, 115(in Chinese).

[21] 司炳君,孙治国,艾庆华. Solid65单元在混凝土结构有限元分析中的应用[J]. 工业建筑,2007,37(1):87-92.
SI Bingjun, SUN Zhiguo, AI Qinghua. Application of Solid65 element in the finite element analysis of concrete structures[J]. Industrial construction, 2007, 37(1): 87-92(in Chinese).

(编辑 史淑英)